



**University of  
Zurich<sup>UZH</sup>**

**Zurich Open Repository and  
Archive**

University of Zurich  
University Library  
Strickhofstrasse 39  
CH-8057 Zurich  
[www.zora.uzh.ch](http://www.zora.uzh.ch)

---

Year: 2014

---

## **Untersuchung und Visualisierung von Gletschergeschwindigkeiten im Zentralen Tien Shan auf Basis von optischen Satelliten-Fernerkundungsdaten**

Kröhnert, Melanie ; Pieczonka, Tino ; Bolch, Tobias ; Buchroithner, Manfred

**Abstract:** Die Gletscher des Zentralen Tien Shan speisen zu einem großen Teil den Fluss Tarim, der die Lebensader nördlich der Wüste Taklamakan im Nordwesten Chinas darstellt. Um den Beitrag der verschiedenen Komponenten der Kryosphäre zum Gesamtabfluss zu quantifizieren, ist es notwendig, die vergangenen und zukünftigen Gletscherveränderungen im Aksu-Tarim-Einzugsgebiet zu erfassen. Die präsentierte Arbeit zielt auf die Erfassung von Gletscherfließbewegungen für zwei Zeiträume (2002/03 und 2010/11) mit einer zeitlichen Differenz von etwa 10 Jahren unter Verwendung frei verfügbarer ASTER- und Landsat TM-Daten ab. Gleichmaßen werden die Bewegungsraten eines surgenden Gletschers anhand multi-temporaler Landsat ETM+-Daten ermittelt. Zur Prozessierung dient ein universell anwendbarer, softwareunabhängiger Workflow mit implizierter Datenvorverarbeitung und Subpixelkorrelation-Messung unter Verwendung des ENVI Add-on COSI-Corr sowie der Stand-Alone-Anwendung CIAS. Fehlzuordnungen, unter anderem durch Wolken und Wolkenschatten, werden im Rahmen der Signifikanzanalyse über das adaptierte NACMA-Verfahren bei ASTER-Daten und Fmask bei Landsat-TM herausgefiltert. Im Ergebnis wurden signifikante Bewegungsfelder für sechs Talgletscher abgeleitet, welche eine Unterscheidung aktiver und inaktiver Gletscherbereiche ermöglichen sowie zur Analyse von Veränderungen der Gletscherdynamik innerhalb des letzten Jahrzehnts herangezogen werden können.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-102075>

Conference or Workshop Item

Published Version

Originally published at:

Kröhnert, Melanie; Pieczonka, Tino; Bolch, Tobias; Buchroithner, Manfred (2014). Untersuchung und Visualisierung von Gletschergeschwindigkeiten im Zentralen Tien Shan auf Basis von optischen Satelliten-Fernerkundungsdaten. In: 62. Deutscher Kartographentag der DGfK e.V., 34. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF e.V. Geoinformatik 2014 der GfGI e.V. und der GiN e.V., Hamburg, Germany, 26 March 2014 - 28 March 2014, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V..

# Untersuchung und Visualisierung von Gletschergeschwindigkeiten im Zentralen Tien Shan auf Basis von optischen Satelliten-Fernerkundungsdaten

MELANIE KRÖHNERT<sup>1,\*</sup>, TINO PIECZONKA<sup>1</sup>, TOBIAS BOLCH<sup>1,2</sup>, MANFRED BUCHROITHNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Kartographie, Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, Deutschland

<sup>2</sup> Geographisches Institut, Universität Zürich, 8057 Zürich, Schweiz

*Zusammenfassung: Die Gletscher des Zentralen Tien Shan speisen zu einem großen Teil den Fluss Tarim, der die Lebensader nördlich der Wüste Taklamakan im Nordwesten Chinas darstellt. Um den Beitrag der verschiedenen Komponenten der Kryosphäre zum Gesamtabfluss zu quantifizieren, ist es notwendig, die vergangenen und zukünftigen Gletscherveränderungen im Aksu-Tarim-Einzugsgebiet zu erfassen.*

*Die präsentierte Arbeit zielt auf die Erfassung von Gletscherfließbewegungen für zwei Zeiträume (2002/03 und 2010/11) mit einer zeitlichen Differenz von etwa 10 Jahren unter Verwendung frei verfügbarer ASTER- und Landsat TM-Daten ab. Gleichmaßen werden die Bewegungsraten eines surgenden Gletschers anhand multi-temporalen Landsat ETM+-Daten ermittelt. Zur Prozessierung dient ein universell anwendbarer, softwareunabhängiger Workflow mit implizierter Datenvorverarbeitung und Subpixelkorrelation-Messung unter Verwendung des ENVI Add-on COSI-Corr sowie der Stand-Alone-Anwendung CIAS. Fehlzuordnungen, unter anderem durch Wolken und Wolkenschatten, werden im Rahmen der Signifikanzanalyse über das adaptierte NACMA-Verfahren bei ASTER-Daten und Fmask bei Landsat-TM herausgefiltert. Im Ergebnis wurden signifikante Bewegungsfelder für sechs Talgletscher abgeleitet, welche eine Unterscheidung aktiver und inaktiver Gletscherbereiche ermöglichen sowie zur Analyse von Veränderungen der Gletscherdynamik innerhalb des letzten Jahrzehnts herangezogen werden können.*

\*E-Mail: [melanie.kroehnert@tu-dresden.de](mailto:melanie.kroehnert@tu-dresden.de)

## 1 Einleitung

Der Tarim in Xinjiang/ Nordwest-China ist eines der längsten, in sich geschlossenen, innerkontinentalen Flusssysteme der Welt. Einer seiner größten Nebenflüsse ist der Aksu, welcher annähernd 75 % des Gesamtabflusses beisteuert. Der Tarim selbst wird zu 40 % glazial gespeist (SORG et al., 2012), womit die Wasserversorgung sehr stark von dem seit den 70er Jahren beobachteten Gletscherrückgang abhängt (PIECZONKA et al., 2013).

Neben der Untersuchung der Gletscherflächen- und Gletschervolumenänderungen, kommt vor allem der Gletscherdynamik eine wichtige Funktion zur Abschätzung der zukünftigen Gletscherentwicklung zu. Unzureichende Zugangsmöglichkeiten sowie die Größe der Gletscher verhindern jedoch umfangreiche In-situ-Messungen.

Die Auswertung von Satellitenbilddaten ermöglicht die Untersuchung einer großen Anzahl an Gletschern auf ihr Bewegungsverhalten in den schwer zugänglichen Hochgebirgsregionen Zentralasiens. Etablierte Verfahren zur Beobachtung von Objektbewegungen und -veränderungen bedienen sich der InSAR- (Interferometric Synthetic Aperture Radar) Technik (LUCKMAN et al., 2007; KUMAR et al., 2009) sowie des SAR Speckle Tracking

(STROZZI et al., 2002), welche bereits erfolgreich im Zentralen Tien Shan (JIA et al., 2013) sowie im Karakorum (PAUL et al. 2013) eingesetzt wurden. In Anbetracht der komplexen Topographie des Studiengebiets und unter dem Anspruch der Kostenminimierung, bietet sich jedoch der Einsatz optischer Satellitenbilddaten als effiziente Alternative an (SCHERLER et al., 2008).

Demzufolge sollen die Gletscherdynamiken im Zentralen Tien Shan im chinesisch-kirgisischen Grenzgebiet unter Verwendung frei verfügbarer ASTER-, Landsat TM- und Landsat ETM+-Daten untersucht werden. Das Studiengebiet umfasst circa 500 Gletscher. Unter ihnen befinden sich die stark schuttbedeckten Talgletscher Inylchek, Kaindy, Tomur, Koxkar, East und West Qongterang. Weiterhin findet sich im kirgisischen Teil der surgende Samoilowitsch-Gletscher, welcher in den Jahren 2001-2003 um mehrere Kilometer vorgestoßen ist. Den höchsten Punkt bildet mit 7439 m der Tomur Peak (Jengish Chokusu), die höchste Erhebung des Tien Shan.

## 2 Studiengebiet und Daten

Zur Ermittlung der Gletschergeschwindigkeiten wird pro Zeitabschnitt ein Satellitenbildpaar, bestehend aus frei verfügbaren Landsat TM- (Thematic Mapper), ETM+- (Enhanced Thematic Mapper Plus) und ASTER- (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) Daten, eingesetzt (Tab. 1).

Tab. 1: Satellitenbilddaten.

Satellit	Sensorsystem	Kanal	Auflösung	Datum_Start	Datum_End	Produktstufe
Terra	ASTER	3N	15 m	2002/08/25	2003/08/28	L1A
Landsat5	TM	B4	30 m	2010/08/16	2011/08/03	L1T
Landsat7	ETM+	B8	15 m	2001/03/08	2001/03/24	L1T

Weiterhin werden im Rahmen der Postprozessierung das SRTM3-DGM der Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Version 4.1 (JARVIS et al., 2008) sowie die 2010er Version des Aksu-Gletscherinventars (PIECZONKA et al., 2013) verwendet.

## 3 Methodik

Die Arbeit zielt auf die Konzeption eines allgemeingültigen, softwareunabhängigen Workflows ab, der sich zur Prozessierung von optischen Fernerkundungsdaten eignet, im Kern auf der Methodik des Feature Tracking basiert und neben der eigentlichen Registrierung von Gletscherbewegungen, die Datenvorverarbeitung, -nachbereitung sowie Visualisierung der Ergebnisse umfasst (Abb. 1). Auch sollte dieser unabhängig von der geographischen Situation des Untersuchungsgebiets einsetzbar sein.

Zur Erhebung der Bewegungsraten werden die seit Februar 2013 frei verfügbare Stand-Alone-Anwendung CIAS (Correlation Image Analysis Software; KÄÄB, 2013) sowie die bereits erfolgreich zur Messung von Oberflächenänderungen im Bereich der Glaziologie (HEID & KÄÄB, 2012; SCHERLER et al, 2008) eingesetzte Software COSI-Corr (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation; LEPRINCE et al., 2007) verwendet.

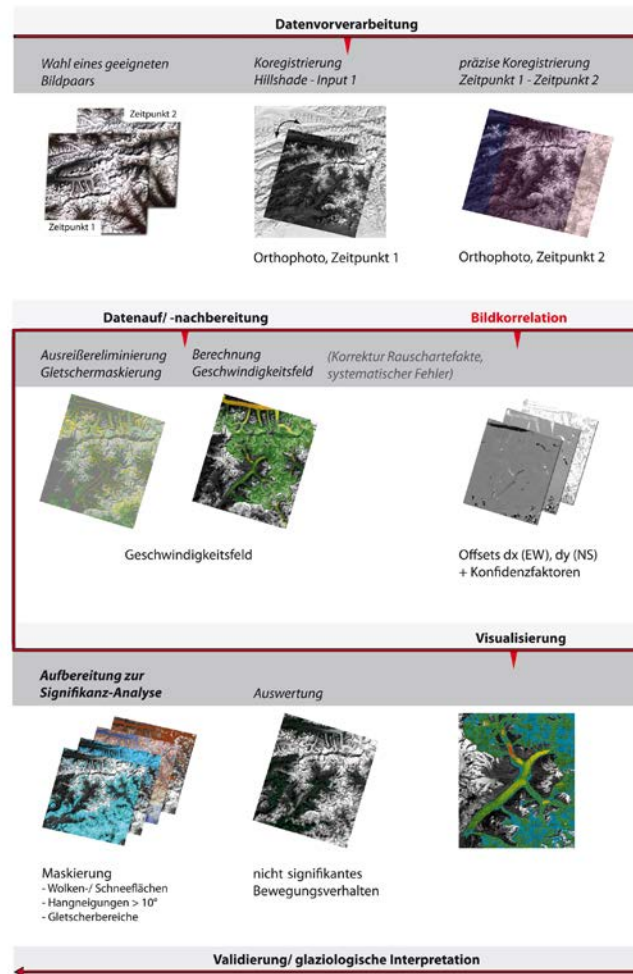


Abb. 1: Workflow zur Erfassung und Nachbereitung von Gletscherfließgeschwindigkeiten aus optischen Satellitenbilddaten.

### 3.1 Datenvorverarbeitung

In Anbetracht der räumlichen Auflösung von maximal 15 m und den zu erwartenden Bewegungsraten von wenigen Metern bis Dezimetern, ist eine präzise Koregistrierung der Bildpaare zur Subpixelkorrelation erforderlich. Die Vorverarbeitung der ASTER-L1A-Daten umfasst die Orthorektifizierung sowie die Koregistrierung anhand des SRTM3-DGM. Aufgrund der zeitlichen Inkonsistenz zwischen den ASTER-Bilddaten und dem SRTM3-Modell, wird die Orthorektifizierung zunächst anhand eines aus den ASTER-Kanälen 3N und 3B erstellten DGMs vorgenommen. Zur effizienten Prozessierung wird während des Stereo-Matching auf den Einsatz zusätzlicher Passpunkte verzichtet und das Modell allein aus den Ancillary-Informationen des ASTER-L1A-Datensatzes erzeugt. Im Vergleich zum SRTM3-CGIAR-DGM zeigten sich beim ASTER-DGM jedoch eine Verkippung sowie Datenlücken in Bereichen starker Wolkenbedeckung. Folglich wird zur Orthorektifizierung auf eine Schummerungsdarstellung des SRTM3-DGM mit Passpunkten in statischen Bildbereichen zurückgegriffen. Die Landsat-TM-L1T- und ETM+-L1T-Szenen können dagegen aufgrund des homogenen Rektifizierungsmodells und Passpunktdatensatzes als quasi-koregistriert angenommen werden.

### 3.2 Subpixelkorrelation

Die Methodik des Feature Tracking wird über die Kreuzkorrelation optischer, zueinander registrierter, Eingangsdaten realisiert. In diesem Fall werden zwei Implementierungsansätze, die normierte Kreuzkorrelation (NCC) durch CIAS sowie COSI-Corr's angepasste, frequenzbasierte Korrelation umgesetzt. Das Prinzip des Feature Tracking basiert auf der Konvergenz eines Suchfensters zwischen einer frei gewählten Master-Aufnahme (meist der früheste Beobachtungszeitpunkt einer Untersuchungszeitreihe) und eines Referenzpatches einer weiteren, in der Regel späteren, Aufnahme. Aus dem maximalen Korrelationskoeffizienten lässt sich der entsprechende Offset bestimmen und nach Abwicklung auf den Untersuchungszeitraum die durchschnittliche Bewegungsrate des betrachteten Objekts ableiten. Die optimale Suchweite wird aus dem doppelten zu erwarteten Offset bestimmt, jedoch in Anbetracht bildtypischer (z. B. Pixelgröße und Bildrauschen) sowie physikalischer Eigenschaften (z. B. saisonale Einflüsse auf die Feature Bewegung), an die Beobachtungssituation angepasst und zeigt zuverlässige Ergebnisse mit einer mindestens um den Faktor vier größer gewählten Suchweite.

### 3.3 Prozessierung der Ergebnisse

Um die Qualität der Korrelationsmessung und folglich die Signifikanz der ermittelten Bewegungsraten einzuschätzen, ist eine umfangreiche Fehleranalyse der Korrelationsergebnisse unumgänglich. Die Ausreißeranalyse steht dabei im Vordergrund und umfasst die Eliminierung von potenziellen Fehlzugeordnungen sowie die Detektion von Bewegungsanomalien bezüglich der Hauptbewegungsrichtung (SCHERLER et al., 2008). Zur Beurteilung der Korrelationskonfidenz dient COSI-Corr's SNR (Signal-to-Noise Ratio) und entsprechend für die Ergebnisse aus CIAS der reine maximale Korrelationskoeffizient, der sich in Verbindung mit einem empirischen Schwellwertverfahren als prädestiniertestes Medium zur Ermittlung potenzieller Fehlzugeordnungen erweist. Bewegungsanomalien lassen sich mit einem geeigneten Distanzschwellwert im Rahmen einer Clusteranalyse über das berechnete Geschwindigkeitsfeld zuverlässig ermitteln und entfernen. Ausreißer werden über die Interquartilsspanne (IQR) herausgefiltert. Für die horizontalen Bewegungen, ermittelt durch COSI-Corr, bietet sich zusätzlich eine Korrektur aufnahmespezifischer, systematischer Artefakte (Streifeneffekte) und des AWGR (Additives Weißes Gaußsches Rauschen) an. Verbleibende Restungenauigkeiten äußern sich zudem oftmals in einem Korrelationsrauschen in der Bewegungsmessung (LEPRINCE et al., 2007). Zur Detektion nicht signifikanter Bewegungen im Korrelationsergebnis werden statische Features auf Bewegungen untersucht. Kritische Bildbereiche werden über die Konfidenz der Korrelationsmessung entfernt. Diesbezüglich sind Wolken- und Schneeflächen sowie Bereiche steiler Hangneigungen  $>10^\circ$  zu eliminieren. Verfahren zur Bestimmung von Wolken und Wolkenschatten sind häufig sensorspezifisch und nicht auf Hochgebirgsregionen übertragbar. Zur Maskierung bietet sich bei Landsat TM- sowie ETM+-Daten die Stand-Alone-Anwendung Fmask an. Die durchschnittlich von Fmask erreichte Genauigkeit bezüglich der fehlerfreien Wolkenklassifikation liegt bei 89.4 % (ZHU & WOODCOCK, 2012), wobei die verbleibenden Restungenauigkeiten als akzeptabel betrachtet werden. In Hinblick auf die ASTER-Ergebnisse kann auf kein standardisiertes Verfahren zur Wolkenmaskierung zurückgegriffen werden. Etablierte Verfahren, welche auf der Schwellwertanalyse verschiedener Bild-Ratios basieren, zeigen nur unzureichende Ergebnisse, die höchstwahrscheinlich auf die

komplexe geographische Situation zurückzuführen sind. Demzufolge wird von festdefinierten Schwellwerten - wie im NACMA-Verfahren (HULLEY & HOOK, 2008) - abgesehen. Stattdessen werden über Histogrammanalysen szenenspezifische Schwellwerte abgeleitet und der NACMA-Algorithmus entsprechend angepasst. Zur Validierung werden die erzeugten Wolkenmasken der ASTER Cloud Mask Database (TONOOKA LABORATORY, 2013) gegenübergestellt.

Abschließend sind dynamische Features in Form von aktiven Gletschergebieten über das Gletscherinventar zu entfernen. Die Signifikanz lässt sich im Ergebnis über den RMSE (Root Mean Square Error) des aufbereiteten Datensatzes ermitteln.

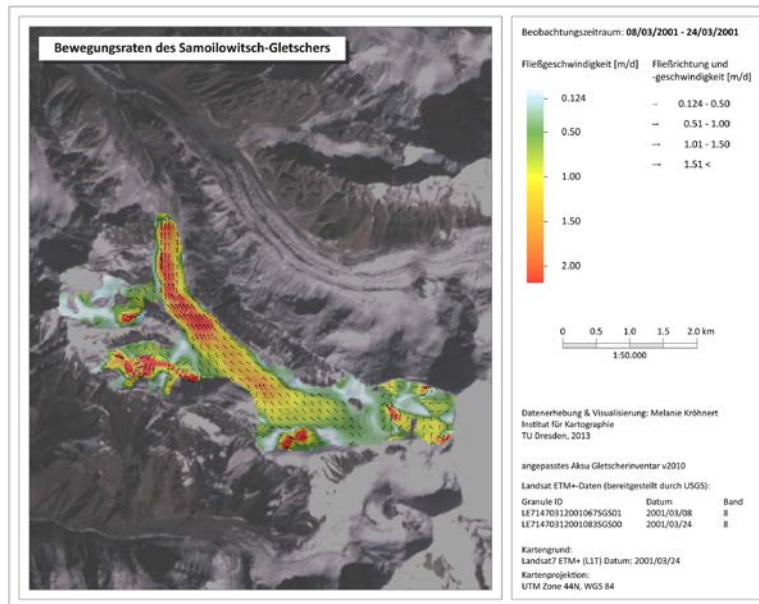


Abb. 2: Darstellung der ermittelten Fließgeschwindigkeiten am Beispiel des Samoilowitsch-Gletschers.

### 3.4 Visualisierung

Die Herausforderung der kartographischen Darstellung von dynamischen Prozessen liegt in der multidimensionalen Visualisierung raum- und zeitbezogener Informationen (KÄÄB et al., 2003). Hier erweist sich der kombinierte Einsatz von Bewegungssignaturen und Flächenfärbungen als geeignete Methode der quantitativen Darstellung horizontaler, gerichteter Bewegungen. Zur Darstellung stark heterogener Geschwindigkeitsfelder eignet sich die Flächenkartogramm-methode. Ist die Spanne der auftretenden Bewegungen gering, empfiehlt sich der stetige Farbverlauf (Abb. 2). Zur richtungsabhängigen Darstellung der Fließbewegungen werden gestufte und gerichtete Pfeilvektoren eingesetzt.

## 4 Ergebnisse

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der Konfidenzanalyse am Beispiel des ASTER-Datensatzes für den Zeitabschnitt 2002/2003 dargestellt. Die resultierenden Bewegungsfelder aus ASTER- und Landsat-TM-Daten zeigt Abb. 3. Deutlich zu erkennen sind hierbei die nicht signifikanten Bewegungen am Ende der schuttbedeckten Zungen des Tomur- und Koxkar-Gletschers.



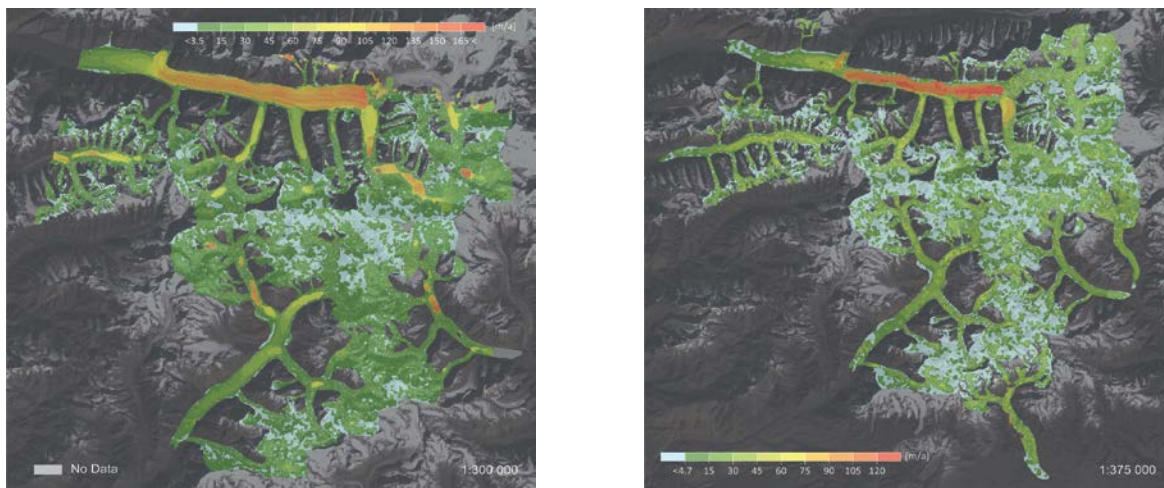


Abb. 3: Visualisierung der Oberflächendynamik der Beobachtungszeiträume 2002/2003 und 2010/2011, berechnet durch COSI-Corr aus ASTER- und Landsat TM-Daten. Links: 2002/2003, rechts: 2010/2011.

### Gletscherfließgeschwindigkeiten im Zeitraum 2002/2003

Zur Verbesserung der ASTER-Korrelationsergebnisse wurde im direkten Anschluss an die Korrelationsmessung sowohl die Korrektur der Streifenartefakte in Ost-West-Richtung als auch die Reduktion des AWGR durchgeführt. Der Vorher-Nachher-Vergleich des Datensatzes zeigt leichte Verbesserungen der horizontalen Standardabweichungen von  $\Delta\sigma_{NS} = 0.04$  m und  $\Delta\sigma_{EW} = 0.11$  m. Der Einfluss von Ausreißern und Fehlkorrelationen auf den Umfang des Datensatzes lässt sich anhand der absoluten und relativen Anzahl verbleibender Messwerte (Tab. 2) nachvollziehen.

Tab. 2: Charakterisierung der Korrelationsergebnisse, ermittelt durch COSI-Corr anhand von koregistrierten ASTER-Daten.

Datensatzbeschreibung	Anzahl verbleibender Messwerte			
	Inylchek	Kaindy	Tomur	West Qongterang
kompletter Konvergenzbereich	<i>Rausch-/ Streifenkorrektur; ungefiltert</i>			
	690 015 (100%)			
untersuchtes Gletschergebiet	107 985 (15.6 %)	16 697 (2.4 %)	90 639 (13.1 %)	31 143 (4.5 %)
	= 245 773 (35.6 %) aller untersuchten Gletscher			
	<i>Rausch-/Streifenkorrektur, gefiltert</i>			
	91 097 (13.2 %)	14 093 (2.0 %)	81 395 (11.8 %)	27 237 (3.9 %)
	= 213 182 (30.9 %) aller untersuchten Gletscher			
Konfidenzverhalten	84.4 %	84.4 %	89.8 %	87.5 %
Messwerte Signifikanzanalyse	12 166 (1.8 %)			
<b>Filteranwendung</b>	Anzahl potenzieller Ausreißer und Fehlkorrelationen			
Bewegungsanomalien: <i>Clusteranalyse</i> ( $d_{Th} = 120$ m):	12 401 (1.8 %)			
Fehlzuordnungen: <i>Schwellwertanalyse</i> (SNR < 0.90):	66 784 (9.7 %)			

Unter Berücksichtigung der Gesamtheit der Messwerte ergibt sich aus dem Verhältnis des gefilterten Datensatzes und den ungefilterten Ergebniswerten, welche lediglich Bewegungsraten in Gletschergebieten charakterisieren, eine mittlere Konfidenz von 86.5 %. Im Zuge der Signifikanzanalyse lässt sich für den Zeitraum 2002/2003 aus dem ermittelten RMSE = 3.48 ein Signifikanz-Schwellwert von  $dx_y = 3.5$  m/a ableiten.

In der Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsfelder (Abb. 3) zeigen sich Geschwindigkeitsabnahmen von durchschnittlich 5 bis 10 m/a im Bereich der jeweiligen Gletscherzungen sowie zunehmende Bewegungsraten bezüglich der einfließenden Seitengletscher von 10 bis 25 m/a im Vergleich zum Zeitabschnitt 2002/2003. Im Zuge der Validierung der Ergebnisse, durch die NCC-Messungen aus CIAS, ist diese rapide Geschwindigkeitsabnahme zu bestätigen. Weiterhin zeigt sich deutlich der Einfluss der Schuttdicke auf die gemessenen Bewegungsraten. Zunehmende Schuttdicken in den unteren Bereichen der Gletscherzungen des Tomur, Koxkar und Inylchek führen zu nicht signifikanten Bewegungen und ermöglichen die Unterscheidung aktiver und stagnierender Gletscherbereiche. Zur Prädiktion der Bewegungsraten im Falle fehlender Daten, bietet sich die Ableitung des Trends über die Profilmessung entlang der Gletscherfließlinie an.

Bei Betrachtung des Konfidenzverhaltens zeigt sich eine generell hohe Zuverlässigkeit der Korrelationen (2002/2003: 87 %, 2010/2011: 93 %). In besonderem Maße wird auf die 99 %-ige Zuverlässigkeit der Untersuchung aus multitemporalen Landsat ETM+-Daten hingewiesen. Aus dem ermittelten RMSE = 0.124 m lässt sich die Genauigkeit der Samoilowitsch-Bewegungsraten auf 1/7 bis 1/8 Px festlegen, welche annähernd der zu erwartenden Prägnanz nach LEPRINCE et al. (2007) entspricht. Gleichmaßen werden die Bewegungsraten der jährlichen Untersuchungen eingeschätzt und ein Genauigkeitspotenzial von 1/4 Px im Zeitraum 2002/2003 aus korrelierten ASTER- sowie 1/7 Px aus Landsat TM-Daten im Zeitabschnitt 2010/2011 ermittelt.

## 5 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit belegt den erfolgreichen Einsatz der Methodik des Feature Tracking unter Verwendung frei verfügbarer optischer Satellitenbilddaten zur Untersuchung der Gletscherfließgeschwindigkeiten im Zentralen Tien Shan. Im Fokus der Arbeit stand die Entwicklung eines universellen Workflows, der im Kern auf dem Verfahren der Subpixelkorrelation basiert und vielfältige Prozesse zur effektiven Vor-/ Nachbereitung der Daten sowie Filterung der Ergebnisse umfasst. Zur Realisierung wurden die Softwarelösungen CIAS und COSI-Corr eingesetzt und auf ihre Qualifikation zur präzisen Ermittlung von Bewegungsraten im Hochgebirge evaluiert. Beide Anwendungen erfüllten das Kriterium der Subpixelgenauigkeit in Hinblick auf die ermittelten Bewegungsraten. Generell ist die dargestellte Methodik für Beobachtungen dynamischer Objekte in Hochgebirgsregionen geeignet.

## 6 Literaturverzeichnis

HEID, T., KÄÄB, A., 2012: Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery. Remote Sensing of Environment, **118**, S. 339-355.



- HULLEY, G. C., HOOK, S. J., 2008: A new methodology for cloud detection and classification with ASTER data. *Geophysical research letters*, **35** (16), S. L16812.
- JARVIS, A., REUTER, H. I., NELSON, A. & GUEVARA, E., 2008: Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. (<http://srtm.csi.cgiar.org>).
- KÄÄB, A., 2013: Image Correlation Software CIAS. (<http://www.mn.uio.no/geo/english/research/projects/icemass/cias/index.html>).
- KÄÄB, A., ISAKOWSKI, Y., WINTER, R., PAUL, F. & NEUMANN, A., 2003: Glaziale und periglaziale Prozesse: Von der statischen zur dynamischen Visualisierung. *Kartographische Nachrichten*, **53** (5), S. 206-212.
- KUMAR, V., VENKATARAMAN, G. & RAO, Y. S., 2009: SAR interferometry and speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2009, **5**, S. 332-335.
- LEPRINCE, S., BARBOT, S., AYOUB, F. & AVOUAC, J. P., 2007: Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45** (6), S. 1529-1558.
- JIA, L., ZHIWEI, L., JIANJUN, Z., XIAOLI, D., CHANGCHENG, W. & JIANLI, C., 2013: Deriving surface motion of mountain glaciers in the Tuomuer-Khan Tengri Mountain Ranges from PALSAR images. *Global and Planetary Change*, **101**, S. 61-71.
- LUCKMAN, A., QUINCEY, D. & BEVAN, S., 2007: The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers. *Remote Sensing of Environment*, **111** (2), S. 172-181.
- PAUL, F., BOLCH, T., KÄÄB, A., NAGLER, T., NUTH, C., SCHARRER, et al., 2013: The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sensing of Environment*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.043>.
- PIECZONKA, T., BOLCH, T., JUNFENG, W. & SHIYIN, L., 2013: Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery. *Remote Sensing of Environment*, **130**, S. 233-244.
- SCHERLER, D., LEPRINCE, S. & STRECKER, M. R., 2008: Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery-Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, **112** (10), S. 3806-3819.
- SORG, A., BOLCH, T., STOFFEL, M., SOLOMINA, O. & BENISTON, M., 2012: Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, **2** (10), S. 725-731.
- STROZZI, T., LUCKMAN, A., MURRAY, T., WEGMÜLLER, U. & WERNER, C. L., 2002: Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40** (11), S. 2384-2391.
- TONOOKA LABORATORY, 2013: ASTER Cloud Mask Database. (<http://tonolab.cis.ibaraki.ac.jp/ASTER/cloud/index.html>).
- ZHU, Z., WOODCOCK, C. E., 2012: Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, **118**, S. 83-94.